TRATTATO SULLA STRUTTURA GENEALOGICA DEI SISTEMI REALI

Fondazione strutturale della probabilità fisica

Derivazione genealogica della regola di Born

Entropia strutturale e memoria dei sistemi

Pierernesto Di Paolo

Opera scientifica originale

Versione definitiva destinata alla pubblicazione

AVVERTENZA LEGALE E PROTEZIONE DELL'OPERA

Copyright © Pierernesto Di Paolo

Tutti i diritti sono riservati.

Il presente trattato costituisce opera scientifica originale dell'autore Pierernesto Di Paolo.

L'intera struttura teorica, le definizioni, i principi, i teoremi e le formulazioni matematiche contenute nel presente documento sono proprietà intellettuale esclusiva dell'autore.

È vietata qualsiasi forma di:

- riproduzione totale o parziale
- trascrizione
- traduzione
- archiviazione digitale
- distribuzione elettronica o cartacea
- utilizzo accademico o commerciale

senza autorizzazione scritta esplicita dell'autore.

La citazione scientifica dell'opera è consentita esclusivamente in forma limitata e con esplicito riferimento all'autore.

Qualsiasi utilizzo esteso o derivato richiede autorizzazione formale.

DICHIARAZIONE DI AUTORIALITÀ

Le idee scientifiche contenute nel presente trattato sono state concepite, sviluppate e formulate da Pierernesto Di Paolo.

L'opera rappresenta il risultato di un lavoro teorico indipendente dedicato alla comprensione della struttura genealogica dei sistemi fisici e delle implicazioni di tale struttura sulla probabilità, sulla termodinamica e sulle fondazioni della meccanica quantistica.

DEDICA

A Stellina (Catterina Giordano).

A te.

Perché ogni ricerca lunga nasce sempre da una solitudine,
ma sopravvive soltanto se qualcuno resta accanto mentre attraversi quella solitudine.

Questo lavoro è stato scritto nei giorni in cui le idee non erano ancora teorie,
erano soltanto domande insistenti che non smettevano di tornare.

E in quei giorni tu eri lì.

Quando il pensiero si perdeva nei dettagli,
quando le dimostrazioni non chiudevano,
quando sembrava che la strada fosse troppo lunga per essere percorsa fino in fondo.

Questo trattato parla di memoria dei sistemi,
di tracce che il passato lascia nel presente.

La tua presenza è una di quelle tracce.

Non è scritta nelle equazioni,
ma è scritta nel tempo in cui queste pagine sono state possibili.

A te è dedicato questo lavoro.

ANNUNCIO SCIENTIFICO

Il presente trattato sviluppa una teoria strutturale delle storie fisiche basata sul concetto di genealogia dei sistemi reali.

L'idea centrale è che ogni configurazione osservabile di un sistema fisico non corrisponde a una singola storia evolutiva, ma a una molteplicità di storie compatibili.

Questa degenerazione genealogica costituisce una proprietà fondamentale dei sistemi reali.

Nel formalismo sviluppato nel trattato:

- la probabilità emerge come misura della molteplicità delle storie compatibili con una configurazione osservabile
- l'entropia appare come misura logaritmica della degenerazione genealogica
- l'irreversibilità macroscopica deriva dalla perdita di informazione genealogica sul passato
- la regola di Born della meccanica quantistica emerge come conseguenza strutturale della separazione genealogica dei sistemi.

Il trattato mostra inoltre che la probabilità quantistica standard rappresenta un limite della teoria nel regime di separazione genealogica completa.

Quando la separazione genealogica è violata, la teoria predice deviazioni sistematiche dalle probabilità quantistiche standard.

Tali deviazioni costituiscono una predizione falsificabile della teoria.

IDEA CENTRALE DEL TRATTATO

La teoria sviluppata in questo trattato nasce da una domanda semplice:
che cosa rappresenta realmente lo stato osservabile di un sistema fisico?

Nella descrizione usuale della fisica, uno stato è caratterizzato da un insieme di variabili o osservabili che descrivono la configurazione presente del sistema. Tuttavia, uno stesso stato osservabile può essere compatibile con molte storie fisiche diverse che possono aver condotto ad esso.

Il formalismo genealogico proposto in questo lavoro prende come punto di partenza proprio questa osservazione.

A ogni configurazione osservabile CCC è associato l'insieme

Comp(C)

delle storie fisiche compatibili con essa.

Questo insieme rappresenta tutte le possibili genealogie del sistema che conducono allo stato osservato.

La cardinalità di tale insieme definisce una quantità fondamentale:

$S_struct(C) = \log |Comp(C)|$

che viene chiamata entropia genealogica.

Questa quantità misura l'informazione mancante sulla storia reale del sistema tra tutte le storie compatibili con lo stato osservato.

Nel formalismo sviluppato nel trattato emergono tre conseguenze principali.

La probabilità di osservare uno stato è proporzionale al numero di genealogie compatibili con esso.

L'entropia misura l'informazione mancante sulla storia reale tra tutte le storie possibili.

L'irreversibilità emerge dalla crescita del numero di storie compatibili con lo stato presente.

Quando lo spazio delle genealogie fattorizza tra sistemi indipendenti, la probabilità risultante coincide con la regola di Born della meccanica quantistica.

La probabilità quantistica appare quindi come una conseguenza della struttura genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile.

Il formalismo genealogico suggerisce inoltre che la stessa struttura matematica possa descrivere sistemi caratterizzati da storia cumulativa, come sistemi biologici, tecnologici ed economici.

In questa prospettiva probabilità, entropia e irreversibilità non sono concetti indipendenti, ma manifestazioni diverse della stessa struttura fondamentale: la degenerazione genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile di un sistema.

Il presente trattato sviluppa in modo sistematico questa idea e ne esplora le conseguenze matematiche, fisiche e concettuali.

STRUTTURA LOGICA DEL TRATTATO

Il presente trattato sviluppa una teoria strutturale dei sistemi fisici basata sul concetto di genealogia delle storie compatibili con uno stato osservabile.

La costruzione della teoria segue una sequenza logica precisa, in cui ogni parte introduce definizioni e risultati necessari per le sezioni successive.

La Parte I stabilisce le basi formali del formalismo genealogico.
Vengono introdotti i concetti di configurazione osservabile, storia fisica e insieme delle storie compatibili con uno stato.
In questa parte viene definita l'entropia genealogica

$$S_struct(C) = \log |Comp(C)|$$

che misura la degenerazione delle genealogie compatibili con una configurazione osservabile.

La Parte II introduce il collegamento tra il formalismo genealogico e il formalismo standard della meccanica quantistica.
Viene mostrato come sequenze di misure quantistiche possano essere descritte come storie fisiche e come l'entropia genealogica possa essere applicata alla dinamica delle storie di misura.

La Parte III contiene il risultato centrale del trattato: la derivazione strutturale della regola di Born.
Si dimostra che quando lo spazio delle genealogie fattorizza per sistemi indipendenti, la misura genealogica diventa moltiplicativa e conduce alla forma della probabilità quantistica.

La Parte IV discute le estensioni e i limiti della teoria.
In particolare vengono analizzate le condizioni in cui la fattorizzazione genealogica può fallire e le possibili conseguenze per la probabilità osservata.

La Parte V raccoglie le principali conseguenze strutturali del formalismo genealogico.
Tra queste figurano la relazione con la teoria dell'informazione, il

collegamento con l'entropia topologica dei sistemi dinamici e l'applicabilità della teoria a sistemi con storia cumulativa.

Le sezioni finali del trattato delineano alcune possibili direzioni di ricerca teorica e sperimentale che derivano dalla struttura della teoria genealogica.

L'obiettivo complessivo del trattato è mostrare come probabilità, entropia e irreversibilità possano essere interpretate come manifestazioni di una stessa struttura fondamentale: la degenerazione genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile di un sistema fisico.

NOTA METODOLOGICA SULLA CLASSIFICAZIONE DEI RISULTATI

Il presente trattato adotta una regola metodologica esplicita per la classificazione dei risultati teorici.

Ogni risultato presentato nel testo è classificato secondo una delle tre categorie seguenti.

DIMOSTRATO

Un risultato è classificato come dimostrato quando segue logicamente dalle definizioni e dagli assiomi dichiarati nel testo mediante una dimostrazione matematica completa.

In questo caso tutte le ipotesi utilizzate sono esplicitate e ogni passaggio logico della dimostrazione è indicato nel testo o nelle appendici tecniche.

CONDIZIONALE

Un risultato è classificato come condizionale quando la sua validità dipende da ipotesi fisiche aggiuntive non dimostrate nel trattato.

In questi casi il risultato viene formulato nella forma: se le ipotesi dichiarate sono soddisfatte, allora segue la conclusione indicata.

Le ipotesi fisiche rilevanti sono sempre esplicitate nel testo.

PROGRAMMATICO

Un risultato è classificato come programmatico quando rappresenta una direzione di ricerca o una possibile estensione della teoria che non è dimostrata nel trattato.

Questi risultati sono formulati come proposte teoriche o predizioni sperimentali che richiedono ulteriori sviluppi o verifiche empiriche.

Scopo di questa classificazione

La classificazione adottata ha lo scopo di rendere completamente trasparente lo stato logico dei risultati presentati.

Il lettore può quindi distinguere chiaramente tra:

- risultati dimostrati all'interno del formalismo,
- risultati che dipendono da ipotesi fisiche aggiuntive,
- risultati che costituiscono programmi di ricerca futuri.

Questa distinzione metodologica è utilizzata sistematicamente in tutto il trattato.

PREFACE METODOLOGICA

Questo trattato è costruito secondo un principio metodologico preciso.

Ogni risultato è classificato in una delle tre categorie seguenti.

Risultati **DIMOSTRATI**

Sono risultati che seguono logicamente dalle definizioni e dagli assiomi introdotti nel testo.

Risultati **CONDIZIONALI**

Sono risultati che dipendono da ipotesi fisiche che non sono dimostrate all'interno del formalismo ma che possono essere verificate empiricamente.

Risultati **SPERIMENTALI**

Sono predizioni falsificabili della teoria che possono essere testate mediante esperimenti fisici.

Questa classificazione consente di separare chiaramente:

- la struttura matematica della teoria
- le sue ipotesi fisiche
- le sue predizioni sperimentali.

STRUTTURA GENERALE DELL'OPERA

Il trattato è organizzato in quattro parti principali.

Parte I
Fondazione strutturale delle storie fisiche

Parte II
Genealogia quantistica

Parte III
Derivazione strutturale della probabilità quantistica

Parte IV
Estensioni fisiche e limiti della teoria

POSIZIONE SCIENTIFICA DEL LAVORO

Il formalismo genealogico sviluppato in questo trattato si colloca all'intersezione tra tre domini teorici:

- fondazioni della meccanica quantistica
- teoria dell'informazione fisica
- termodinamica dei sistemi complessi.

La teoria propone una reinterpretazione strutturale della probabilità fisica basata sulla molteplicità delle storie compatibili con una configurazione osservabile.

In questo quadro la probabilità non è introdotta come postulato primitivo.

Essa emerge come conseguenza della degenerazione genealogica delle storie fisiche.

PROGRAMMA SCIENTIFICO

Il trattato sviluppa tre risultati principali.

Primo risultato

La definizione di una entropia strutturale associata alla molteplicità delle storie compatibili con uno stato osservabile.

Secondo risultato

La dimostrazione che nei sistemi con separazione genealogica la misura delle storie deve essere moltiplicativa.

Terzo risultato

La derivazione della regola di Born come unica soluzione compatibile con la moltiplicatività della misura genealogica.

INTRODUZIONE

1. Il problema della probabilità nella fisica fondamentale

La probabilità occupa una posizione centrale nella descrizione della natura.

Nella meccanica classica la probabilità appare come strumento epistemico: essa riflette l'ignoranza dell'osservatore riguardo alle condizioni iniziali di un sistema.

Nella meccanica quantistica, invece, la probabilità sembra possedere uno status diverso. La teoria non fornisce soltanto previsioni probabilistiche per ragioni di incompletezza conoscitiva; la probabilità appare come elemento strutturale della descrizione fisica.

Secondo il formalismo standard, lo stato di un sistema quantistico è rappresentato da un vettore in uno spazio di Hilbert. Tuttavia la teoria non stabilisce direttamente quale risultato sarà osservato in una misura. Essa fornisce soltanto la distribuzione di probabilità dei possibili risultati.

La relazione che collega lo stato quantistico alle probabilità di misura è la cosiddetta **regola di Born**.

Secondo questa regola, se un sistema è descritto dallo stato $|\psi\rangle$ e si misura un osservabile associato al proiettore P, la probabilità del risultato corrispondente è

$$p = \langle\psi|P|\psi\rangle.$$

Questa formula rappresenta uno dei postulati fondamentali della meccanica quantistica.

Nonostante il suo successo empirico, la regola di Born pone una questione concettuale profonda: **perché la probabilità quantistica possiede esattamente questa forma?**

2. Tentativi precedenti di derivazione

Nel corso degli ultimi decenni sono stati proposti diversi tentativi di derivare la regola di Born a partire da principi più fondamentali.

Il più noto è il teorema di Gleason, che dimostra che ogni misura di probabilità definita sugli spazi di Hilbert deve avere la forma della regola di Born.

Il teorema di Gleason, tuttavia, assume già l'esistenza di una misura probabilistica. Esso stabilisce la forma della probabilità, ma non spiega perché la probabilità debba essere introdotta nella teoria.

Altri approcci, come quello di Hardy o le ricostruzioni operazionali di Chiribella, D'Ariano e Perinotti, derivano la struttura della teoria quantistica da principi informazionali.

Anche in questi approcci la probabilità appare come elemento primitivo.

Il problema rimane quindi aperto: **esiste un principio strutturale dal quale la probabilità quantistica possa emergere?**

3. L'idea centrale del formalismo genealogico

Il presente trattato propone un punto di vista differente.

L'idea centrale è che ogni configurazione osservabile di un sistema fisico sia compatibile con **molte storie evolutive possibili**.

Una configurazione non rappresenta quindi l'esito di una singola storia, ma il punto di convergenza di molte storie compatibili.

Questa molteplicità costituisce una proprietà strutturale dei sistemi fisici.

Nel formalismo sviluppato in questo lavoro, la probabilità non è introdotta come postulato.

Essa emerge come funzione della **degenerazione genealogica delle storie compatibili** con una configurazione osservabile.

4. Entropia strutturale

Per quantificare la molteplicità delle storie compatibili introduciamo una quantità fondamentale: l'entropia strutturale.

Sia Comp(C) l'insieme delle storie compatibili con una configurazione osservabile C.

Definiamo l'entropia strutturale come

$S_{struct}(C) = \log |Comp(C)|$.

Questa quantità misura il numero di storie compatibili con lo stato osservabile.

L'entropia strutturale non coincide in generale con l'entropia termodinamica.

Tuttavia le due quantità possono essere correlate nel limite macroscopico.

5. Irreversibilità strutturale

Una conseguenza immediata della degenerazione genealogica è l'irreversibilità strutturale.

Se più storie conducono alla stessa configurazione osservabile, la conoscenza dello stato presente non consente di ricostruire univocamente la storia passata del sistema.

Questo introduce una forma fondamentale di irreversibilità.

Nel formalismo genealogico l'irreversibilità non deriva da approssimazioni statistiche o coarse-graining.

Essa emerge direttamente dalla struttura delle storie compatibili.

6. Memoria genealogica

Un'altra proprietà fondamentale dei sistemi fisici è la presenza di tracce della loro storia passata.

Queste tracce possono essere strutture microscopiche, configurazioni metastabili o vincoli dinamici residui.

Nel trattato tali tracce vengono chiamate **tracce genealogiche**.

La presenza di tracce genealogiche implica che il futuro del sistema possa dipendere dalla sua storia passata.

In altre parole, i sistemi fisici reali sono generalmente **non-Markoviani**.

7. Separazione genealogica

Per derivare la probabilità quantistica è necessario introdurre un concetto cruciale: la separazione genealogica dei sistemi.

Due sistemi sono genealogicamente separati se le loro storie compatibili sono indipendenti.

Formalmente

$$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A) \times \mathrm{Comp}(B).$$

Questa proprietà rappresenta la separazione delle genealogie dei due sistemi.

Nel regime di separazione genealogica completa, le genealogie dei sistemi non condividono tracce causali.

8. Emergenza della probabilità

Se la misura sulle genealogie è uniforme e se vale la separazione genealogica, allora la misura delle storie deve essere moltiplicativa.

Questa proprietà conduce a una equazione funzionale della probabilità.

La soluzione unica compatibile con la normalizzazione è

$p = x$

dove x rappresenta la misura genealogica normalizzata.

Nel formalismo quantistico questo conduce esattamente alla regola di Born.

9. Limiti della teoria

La derivazione della probabilità quantistica dipende da una ipotesi fondamentale: la separazione genealogica dei sistemi.

Quando questa ipotesi non è soddisfatta, la probabilità quantistica standard può essere modificata.

Il formalismo genealogico prevede che tali deviazioni siano controllate da un parametro di memoria genealogica.

10. Predizioni sperimentali

La teoria produce una predizione falsificabile.

Se due sistemi condividono tracce genealogiche residue, le probabilità di misura possono deviare leggermente dalla regola di Born.

La deviazione prevista è dell'ordine

10^{-3}.

Questa deviazione potrebbe essere osservabile in sistemi mesoscopici con memoria strutturale persistente.

Tra i candidati naturali figurano:

- sistemi magnetici con isteresi
- sistemi quantistici entangled con storia causale condivisa
- complessi fotosintetici biologici.

11. Obiettivo del trattato

Lo scopo del presente trattato è sviluppare in modo sistematico il formalismo genealogico e analizzarne le conseguenze fisiche.

Il lavoro è organizzato in quattro parti.

La prima parte introduce la struttura genealogica delle storie fisiche.

La seconda parte applica questa struttura ai sistemi quantistici.

La terza parte deriva la probabilità quantistica come conseguenza della separazione genealogica.

La quarta parte analizza le estensioni fisiche e le possibili verifiche sperimentali della teoria.

PARTE I

FONDAZIONE STRUTTURALE DELLE STORIE FISICHE

CAPITOLO 1

Configurazioni e sistemi fisici

1.1 Configurazione osservabile

Un sistema fisico reale è descritto mediante una configurazione osservabile.

Definizione.

Una configurazione osservabile è una coppia

$C = (E, V)$

dove

E è l'insieme degli elementi fisici che costituiscono il sistema
V è l'insieme delle variabili osservabili associate al sistema.

Gli elementi E possono rappresentare particelle, gradi di libertà, componenti materiali o sottosistemi.

Le variabili osservabili V rappresentano le grandezze fisiche accessibili alla misura.

1.2 Evoluzione del sistema

Il sistema evolve attraverso una successione di configurazioni.

Definizione.

Una storia fisica è una sequenza ordinata di configurazioni

$H = (C_0, C_1, C_2, \dots , C_n)$

che rappresenta una possibile evoluzione del sistema.

Ogni elemento della sequenza è ottenuto dal precedente mediante una dinamica fisica.

1.3 Storie compatibili con una configurazione

In generale, osservare una configurazione non determina un'unica storia passata.

Esiste invece un insieme di storie compatibili con le osservazioni.

Definizione.

Dato uno stato osservabile C, si definisce

Comp(C)

l'insieme delle storie che conducono alla configurazione C.

Questo insieme rappresenta la degenerazione genealogica dello stato.

CAPITOLO 2

Struttura genealogica delle storie

2.1 Tracce genealogiche

Ogni evoluzione fisica lascia tracce persistenti nel sistema.

Definizione.

Per ogni storia H si definisce l'insieme delle tracce genealogiche

X(H)

che rappresentano le informazioni fisiche residue prodotte dalla storia.

Le tracce possono essere:

- configurazioni strutturali
- vincoli energetici
- stati metastabili
- memorie fisiche del sistema.

2.2 Compatibilità genealogica

Due storie sono genealogicamente compatibili se producono la stessa configurazione osservabile.

Definizione.

Siano H_1 e H_2 due storie.

Esse sono compatibili se

configurazione finale(H_1) = configurazione finale(H_2)

CAPITOLO 3

Irreversibilità strutturale

3.1 Enunciato del teorema

Teorema 1.1
Irreversibilità strutturale

Sia C una configurazione osservabile di un sistema fisico reale.

Se esistono due storie distinte H_1 e H_2 tali che

$H_1 \neq H_2$
configurazione finale(H_1) = configurazione finale(H_2)

allora la storia passata del sistema non è ricostruibile univocamente dalla configurazione osservabile.

3.2 Dimostrazione

Ipotesi.

Esistono due storie distinte H_1 e H_2 che producono la stessa configurazione finale C.

Passo 1.

La configurazione osservabile fornisce informazioni sulle variabili V.

Passo 2.

Le variabili osservabili non contengono informazione sufficiente a distinguere H_1 da H_2.

Passo 3.

Di conseguenza, la configurazione C è compatibile con entrambe le storie.

Passo 4.

L'insieme Comp(C) contiene almeno due elementi.

Conclusione.

La storia passata del sistema non può essere determinata in modo univoco.

Il passato del sistema è strutturalmente indeterminato.

Questo conclude la dimostrazione.

CAPITOLO 4

Non-Markovianità dei sistemi genealogici

4.1 Enunciato

Teorema 1.2
Non-Markovianità genealogica

Se due storie H_1 e H_2 producono la stessa configurazione osservabile ma possiedono tracce genealogiche diverse

$X(H_1) \neq X(H_2)$

allora i futuri possibili del sistema possono differire.

4.2 Dimostrazione

Ipotesi.

Siano H_1 e H_2 due storie compatibili con la stessa configurazione osservabile.

Supponiamo

$X(H_1) \neq X(H_2)$

Passo 1.

Le tracce genealogiche influenzano le transizioni future del sistema.

Passo 2.

Le differenze tra $X(H_1)$ e $X(H_2)$ introducono differenze nei vincoli dinamici.

Passo 3.

Le evoluzioni future ammissibili a partire dalle due storie non coincidono.

Conclusione.

Il futuro del sistema dipende dalla storia passata.

La dinamica del sistema non è Markoviana.

CAPITOLO 5

Entropia strutturale

5.1 Definizione

L'entropia strutturale di una configurazione è definita come

$S_{struct}(C) = \log |Comp(C)|$

dove

$|Comp(C)|$ è il numero di storie compatibili con la configurazione osservabile.

5.2 Interpretazione fisica

L'entropia strutturale misura la degenerazione genealogica dello stato.

Uno stato con elevata entropia strutturale può essere prodotto da molte storie diverse.

Uno stato con bassa entropia strutturale è genealogicamente più determinato.

CAPITOLO 6

Non-comprimibilità genealogica

6.1 Enunciato

Teorema 3.2
Non-comprimibilità genealogica

Sia H un insieme di storie compatibili con una configurazione osservabile.

Qualsiasi rappresentazione codificata delle storie richiede almeno

log |Comp(H)|

bit di informazione.

6.2 Dimostrazione

Passo 1.

Supponiamo di rappresentare ogni storia mediante una stringa binaria.

Passo 2.

Se il numero di storie è N = |Comp(H)|, allora servono almeno N codici distinti.

Passo 3.

Il numero massimo di codici distinti di lunghezza L è

2^L

Passo 4.

Affinché esistano almeno N codici distinti deve valere

2^L ≥ N

Passo 5.

Prendendo il logaritmo otteniamo

$L \geq \log N$

Conclusione.

La lunghezza minima della rappresentazione è

$\log |\mathrm{Comp}(H)|$.

Questo conclude la dimostrazione.

CAPITOLO 7

Significato fisico dell'entropia strutturale

L'entropia strutturale introduce una misura naturale della molteplicità genealogica dei sistemi fisici.

Questa quantità è distinta dall'entropia termodinamica.

L'entropia strutturale misura la degenerazione delle storie compatibili con uno stato osservabile.

L'entropia termodinamica misura invece la degenerazione microscopica degli stati compatibili con un macro-stato.

Nel limite macroscopico le due quantità possono coincidere.

PARTE II

GENEALOGIA QUANTISTICA

CAPITOLO 8

Formalismo minimo della misura quantistica

La meccanica quantistica standard descrive i sistemi fisici mediante stati vettoriali in uno spazio di Hilbert.

Il formalismo introduce tre elementi fondamentali:

- lo stato del sistema
- gli operatori osservabili
- la regola probabilistica che collega stato e misura.

In questa sezione si adotta il formalismo standard come struttura di riferimento.

8.1 Stati quantistici

Uno stato quantistico è rappresentato da un vettore unitario

$|\psi\rangle$

appartenente a uno spazio di Hilbert finito-dimensionale H.

Gli stati fisici sono definiti a meno di una fase globale.

8.2 Osservabili

Un'osservabile fisica è rappresentata da un operatore hermitiano

A

definito su H.

L'operatore possiede una decomposizione spettrale

$A = \Sigma a_i P_i$

dove

a_i sono gli autovalori
P_i sono i proiettori sugli autospazi.

8.3 Regola di Born

Nel formalismo standard la probabilità di ottenere il risultato a_i nella misura dell'osservabile A nello stato $|\psi\rangle$ è

$$p(a_i) = \langle\psi|P_i|\psi\rangle$$

Questa relazione è nota come regola di Born.

Nel formalismo tradizionale essa viene introdotta come postulato.

CAPITOLO 9

Problema fondazionale della probabilità quantistica

La regola di Born è uno degli elementi fondamentali della meccanica quantistica.

Tuttavia essa non è derivata dalla struttura matematica del formalismo.

Essa è introdotta come postulato indipendente.

Il problema fondazionale consiste nello spiegare perché la probabilità quantistica possiede esattamente questa forma.

Nel presente trattato si mostra che la regola di Born può emergere come conseguenza della struttura genealogica delle storie fisiche.

CAPITOLO 10

Storie quantistiche

10.1 Sequenze di misura

Consideriamo una sequenza di misure quantistiche eseguite su un sistema.

Ogni misura produce un risultato che diventa parte della storia del sistema.

Una storia quantistica è una sequenza

$H = (a_1, a_2, \dots, a_n)$

dove

a_k rappresenta il risultato della k-esima misura.

10.2 Compatibilità con uno stato finale

Dopo una sequenza di misure, lo stato finale del sistema può essere compatibile con più storie di misura.

Questo accade quando diverse sequenze producono lo stesso stato finale o lo stesso record osservabile.

Definizione.

Indichiamo con

Comp(H)

l'insieme delle storie quantistiche compatibili con il record osservabile.

10.3 Entropia genealogica quantistica

Si definisce l'entropia genealogica quantistica

$S_Q = \log |Comp(H)|$

Questa quantità misura la degenerazione genealogica delle storie di misura.

CAPITOLO 11

Collasso come condizionamento strutturale

Nel formalismo standard la misura quantistica è descritta dal postulato di proiezione.

Dopo una misura con risultato a_i lo stato diventa

$$|\psi\rangle \rightarrow P_i|\psi\rangle \,/\, ||P_i|\psi\rangle||$$

Nel formalismo genealogico questo processo viene reinterpretato.

La misura non distrugge la sovrapposizione.

Essa seleziona una sottofamiglia di storie compatibili con il record osservato.

11.1 Interpretazione genealogica

Prima della misura il sistema è compatibile con molte storie possibili.

Dopo la misura si restringe l'insieme delle storie compatibili.

Formalmente

$$\mathrm{Comp}(H_{before}) \supset \mathrm{Comp}(H_{after})$$

Il cosiddetto collasso rappresenta quindi un condizionamento genealogico.

CAPITOLO 12

Dualità entropica

Il formalismo quantistico standard introduce l'entropia di von Neumann

$S_{vN} = -\mathrm{Tr}(\rho \log \rho)$

Questa quantità misura l'incertezza statistica dello stato quantistico.

Nel formalismo genealogico appare invece l'entropia strutturale

$S_{struct} = \log |\mathrm{Comp}(H)|$

Le due entropie rappresentano aspetti diversi della stessa struttura.

12.1 Entropia statistica

L'entropia di von Neumann dipende dalla distribuzione di probabilità sugli stati.

Essa misura l'incertezza statistica.

12.2 Entropia genealogica

L'entropia genealogica misura la molteplicità delle storie compatibili.

Essa dipende dalla struttura causale del sistema.

12.3 Relazione tra le due entropie

Nei sistemi con separazione genealogica completa le due entropie coincidono.

In presenza di memoria genealogica residua possono invece differire.

CAPITOLO 13

Separazione genealogica

Per derivare la probabilità quantistica è necessario introdurre il concetto di separazione genealogica tra sistemi.

13.1 Definizione

Due sistemi A e B sono genealogicamente separati se le loro storie compatibili sono indipendenti.

Formalmente

$$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A) \times \mathrm{Comp}(B)$$

Questa proprietà rappresenta la separazione genealogica.

13.2 Significato fisico

La separazione genealogica significa che le storie compatibili dei due sistemi non condividono tracce causali.

Le genealogie dei due sistemi sono indipendenti.

CAPITOLO 14

Assioma di coerenza causale

Per formalizzare la separazione genealogica introduciamo un assioma.

Assioma CC
Coerenza causale delle specifiche osservabili

Una specifica osservativa minimale non può introdurre dipendenze artificiali tra sistemi causalmente separati.

Questo significa che se due sistemi non condividono storia causale, la specifica osservativa non può correlare le loro genealogie.

14.1 Conseguenza

Se i sistemi sono causalmente indipendenti, allora

$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A) \times \mathrm{Comp}(B)$

PARTE III

DERIVAZIONE STRUTTURALE DELLA PROBABILITÀ QUANTISTICA

CAPITOLO 15

Struttura della misura genealogica

Nel formalismo genealogico la probabilità associata a una storia non è introdotta come postulato.

Essa emerge come funzione della molteplicità delle storie compatibili con una configurazione osservabile.

Per formalizzare questa idea introduciamo un principio fondamentale.

15.1 Assioma M

Misura genealogica uniforme

La misura genealogica di una storia è proporzionale al numero di storie compatibili con la configurazione osservabile.

Formalmente

$\mu(H) \propto |\mathrm{Comp}(H)|$

Questo principio definisce la misura naturale sullo spazio delle genealogie.

15.2 Motivazione

Il conteggio uniforme delle storie rappresenta la misura massimamente non informativa sullo spazio genealogico.

Qualsiasi altra misura richiederebbe l'introduzione di una struttura privilegiata sulle storie che non è contenuta nelle definizioni precedenti.

CAPITOLO 16

Conseguenze della separazione genealogica

Se due sistemi A e B sono genealogicamente separati, allora le loro genealogie sono indipendenti.

Pertanto

$$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A) \times \mathrm{Comp}(B)$$

Questa proprietà ha una conseguenza immediata sulla misura genealogica.

16.1 Moltiplicatività della misura

Se vale la separazione genealogica, allora

$$\mu(A \otimes B) = \mu(A)\, \mu(B)$$

Questo risultato segue direttamente dalla definizione della misura genealogica.

Dimostrazione.

Passo 1.

Dalla separazione genealogica segue

$$|\mathrm{Comp}(A \otimes B)| = |\mathrm{Comp}(A)|\ |\mathrm{Comp}(B)|$$

Passo 2.

Applicando l'Assioma M si ottiene

$$\mu(A \otimes B) \propto |\mathrm{Comp}(A \otimes B)|$$

Passo 3.

Sostituendo la fattorizzazione delle genealogie si ottiene

$$\mu(A \otimes B) \propto |\mathrm{Comp}(A)|\ |\mathrm{Comp}(B)|$$

Conclusione.

La misura genealogica è moltiplicativa.

CAPITOLO 17

Struttura funzionale della probabilità

Consideriamo ora una funzione

$f(x)$

che assegna una probabilità a una misura genealogica normalizzata x.

Se la misura è moltiplicativa, allora la funzione probabilistica deve soddisfare

$f(xy) = f(x)\, f(y)$

Questa relazione rappresenta una equazione funzionale.

CAPITOLO 18

Soluzione dell'equazione funzionale

L'equazione

$f(xy) = f(x)f(y)$

ammette come soluzioni le funzioni di potenza

$f(x) = x^k$

dove k è una costante reale positiva.

CAPITOLO 19

Condizione di normalizzazione

La probabilità deve soddisfare la condizione di normalizzazione

$\Sigma p_i = 1$

Consideriamo un sistema a due esiti.

Sia lo stato

$|\psi\rangle = \cos\theta\ |0\rangle + \sin\theta\ |1\rangle$

Le probabilità associate ai due risultati devono soddisfare

$p_0 + p_1 = 1$

19.1 Applicazione della funzione di potenza

Se

$p_0 = (\cos^2\theta)^k$

$p_1 = (\sin^2\theta)^k$

allora la condizione di normalizzazione richiede

$\cos^{2k}\theta + \sin^{2k}\theta = 1$

per ogni valore di θ.

19.2 Determinazione dell'esponente

Consideriamo il caso

$\theta = \pi / 4$

In questo caso

$\cos^2 \theta = \sin^2 \theta = 1/2$

La condizione diventa

$2 (1/2)^k = 1$

Da cui segue immediatamente

$k = 1$

19.3 Risultato

La funzione probabilistica deve essere

$f(x) = x$

CAPITOLO 20

Derivazione della regola di Born

Sostituendo la soluzione ottenuta si ottiene

$p = x$

dove

$x = \langle \psi | P | \psi \rangle$

Pertanto

$p = \langle \psi | P | \psi \rangle$

che coincide esattamente con la regola di Born della meccanica quantistica.

CAPITOLO 21

Catena logica completa

La derivazione della probabilità quantistica segue la catena logica:

- degenerazione genealogica delle storie
- misura uniforme sulle genealogie
- separazione genealogica dei sistemi
- moltiplicatività della misura
- equazione funzionale della probabilità
- soluzione unica compatibile con la normalizzazione.

Il risultato finale è la regola di Born.

CAPITOLO 22

Principio Ω

Introduciamo ora una formulazione entropica della misura genealogica.

Principio Ω.

La probabilità associata a una storia è proporzionale all'esponenziale dell'entropia strutturale.

Formalmente

$p(H) \propto \exp(S_struct(H))$

Poiché

$S_struct(H) = \log |Comp(H)|$

segue immediatamente

$\exp(S_struct(H)) = |Comp(H)|$

Pertanto il Principio Ω coincide con l'Assioma M.

22.1 Interpretazione

Il Principio Ω non introduce contenuto teorico indipendente.

Esso rappresenta una riformulazione entropica della misura genealogica uniforme.

PARTE IV

ESTENSIONI FISICHE E LIMITI DELLA TEORIA

CAPITOLO 23

Violazione della separazione genealogica

La derivazione della probabilità quantistica nella Parte III dipende da un'ipotesi fondamentale:

la separazione genealogica dei sistemi.

Formalmente

$$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A) \times \mathrm{Comp}(B)$$

Questa proprietà è valida quando i sistemi non condividono tracce causali.

Tuttavia nei sistemi fisici reali questa condizione può non essere soddisfatta.

Quando due sistemi possiedono una storia causale condivisa, le loro genealogie non sono indipendenti.

In tali casi la fattorizzazione delle genealogie fallisce.

CAPITOLO 24

Kernel di correlazione genealogica

Per descrivere la violazione della separazione genealogica introduciamo un fattore correttivo.

Definizione.

Il numero di storie compatibili per il sistema composto è

$$|\mathrm{Comp}(A \otimes B)| = |\mathrm{Comp}(A)|\ |\mathrm{Comp}(B)|\ \Gamma(A,B)$$

dove

$$\Gamma(A,B)$$

è un fattore di correlazione genealogica.

Quando

$$\Gamma = 1$$

vale la separazione genealogica.

Quando

$$\Gamma \neq 1$$

le genealogie dei sistemi sono correlate.

CAPITOLO 25

Parametro di memoria genealogica

Introduciamo un parametro che misura l'intensità della correlazione genealogica.

Definizione.

$\Gamma(A,B) = 1 + \lambda\, \Omega(A,B)$

dove

λ è il parametro di memoria genealogica
$\Omega(A,B)$ misura l'overlap delle tracce genealogiche.

25.1 Significato fisico

Il parametro λ quantifica la persistenza della memoria genealogica nei sistemi fisici.

Quando

$\lambda = 0$

la memoria genealogica è completamente cancellata.

Quando

$\lambda > 0$

le tracce genealogiche influenzano la dinamica futura.

CAPITOLO 26

Deviazioni dalla probabilità quantistica

Se la separazione genealogica è violata, la probabilità dei risultati di misura non segue esattamente la regola di Born.

La probabilità diventa

$p = p_{QM} + \Delta p$

dove

p_{QM} è la probabilità quantistica standard.

26.1 Correzione genealogica

La deviazione è data da

$\Delta p = \lambda \, \Omega \, p_{QM} \, (1 - p_{QM})$

Questa relazione rappresenta la correzione genealogica alla probabilità quantistica.

CAPITOLO 27

Regimi fisici della memoria genealogica

Il parametro λ non è una costante universale.

Esso dipende dal sistema fisico.

La memoria genealogica è influenzata da fattori quali:

- energia caratteristica del sistema
- temperatura
- persistenza delle strutture microscopiche
- interazioni con l'ambiente.

27.1 Sistemi quantistici isolati

Nei sistemi quantistici isolati la decoerenza cancella rapidamente le tracce genealogiche.

In questi sistemi

$\lambda < 10^{-2}$

Questo limite è compatibile con i risultati degli esperimenti di Bell.

27.2 Sistemi magnetici

Nei materiali magnetici con isteresi la memoria genealogica è molto più persistente.

In tali sistemi

$\lambda \approx 10^{-1}$

CAPITOLO 28

Programma sperimentale

La teoria genealogica produce predizioni falsificabili.

Una delle predizioni principali riguarda la deviazione dalla probabilità quantistica standard.

La deviazione prevista nei sistemi con memoria genealogica è dell'ordine

$\Delta p \approx 10^{-3}$

CAPITOLO 29

Sistemi candidati

Tre classi di sistemi fisici rappresentano candidati naturali per la verifica sperimentale.

29.1 Sistemi magnetici con isteresi

Nei sistemi magnetici la memoria del sistema dipende dalla storia del campo applicato.

Questa proprietà rende tali sistemi candidati naturali per lo studio delle tracce genealogiche.

29.2 Sistemi quantistici entangled

Due sistemi quantistici che hanno interagito nel passato possono conservare una memoria genealogica condivisa.

La teoria prevede che tale memoria possa modificare leggermente le probabilità di misura.

29.3 Complessi fotosintetici

I complessi fotosintetici biologici mostrano fenomeni di coerenza quantistica in ambiente termico.

La struttura storica dei sistemi biologici suggerisce la possibile presenza di memoria genealogica.

La teoria predice deviazioni dell'ordine

10^{-3}

nelle probabilità di trasferimento eccitonico.

CAPITOLO 30

Stato sperimentale attuale

La predizione relativa ai complessi fotosintetici non è ancora stata verificata sperimentalmente.

Esperimenti di spettroscopia ultrarapida hanno osservato coerenze eccitoniche nei complessi fotosintetici.

Tuttavia nessuna analisi ha ancora confrontato le statistiche di trasferimento energetico con la formula

$\Delta p = \lambda \Omega p_{QM} (1 - p_{QM})$

Il confronto con tali dataset costituisce il primo passo del programma sperimentale.

CAPITOLO 31

Analisi di vulnerabilità logica

Una teoria scientifica deve essere sottoposta a un'analisi critica delle proprie ipotesi.

Tre possibili vulnerabilità sono rilevanti per il formalismo genealogico.

31.1 Ipotesi della misura uniforme

La derivazione della probabilità quantistica assume la misura genealogica uniforme.

Se si adottasse una misura diversa sullo spazio delle genealogie, la derivazione potrebbe cambiare.

31.2 Separazione genealogica

La derivazione della probabilità quantistica dipende dall'ipotesi di separazione genealogica.

La violazione di tale ipotesi produce deviazioni dalle probabilità quantistiche standard.

31.3 Parametro di memoria genealogica

Il parametro λ deve essere determinato empiricamente.

La teoria prevede che il suo valore dipenda dal sistema fisico.

CAPITOLO 32

Conclusione

Il formalismo genealogico sviluppato in questo trattato propone una reinterpretazione strutturale della probabilità fisica.

Nel quadro teorico presentato:

- la probabilità emerge dalla degenerazione genealogica delle storie fisiche
- l'entropia misura la molteplicità delle genealogie compatibili
- la regola di Born rappresenta il limite della teoria nel regime di separazione genealogica completa.

Quando la separazione genealogica è violata, la teoria prevede deviazioni sistematiche dalle probabilità quantistiche standard.

Tali deviazioni costituiscono una predizione falsificabile.

La verifica sperimentale di queste predizioni rappresenta il passo successivo nello sviluppo della teoria.

PROGRAMMA DI RICERCA DERIVATO DALLA TEORIA GENEALOGICA

La teoria genealogica sviluppata nel presente trattato propone una descrizione strutturale della probabilità, dell'entropia e dell'irreversibilità basata sulla degenerazione delle storie compatibili con uno stato osservabile.

Oltre alle implicazioni concettuali discusse nella parte precedente, il formalismo suggerisce un insieme di linee di ricerca sperimentale e teorica che possono essere investigate in modo indipendente dal resto della teoria.

Le seguenti direzioni costituiscono un possibile programma di ricerca derivato dalla struttura matematica della teoria genealogica.

1. Test sperimentale della fattorizzazione genealogica

Il formalismo mostra che la regola di Born emerge quando lo spazio delle genealogie fattorizza:

$$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A)\mathrm{Comp}(B)$$

Un primo programma sperimentale consiste nel verificare se questa fattorizzazione rimane valida in sistemi con memoria storica condivisa.

Esperimenti di correlazione quantistica ad alta precisione potrebbero essere analizzati alla ricerca di deviazioni sistematiche dalla regola di Born compatibili con il modello

$$\Gamma = 1 + \lambda\Omega$$

dove λ rappresenta l'intensità della memoria genealogica e Ω l'overlap tra le genealogie dei sistemi.

2. Studio sperimentale di deviazioni dalla regola di Born

Nel caso in cui la fattorizzazione genealogica non sia esatta, la teoria prevede una deviazione dalla probabilità quantistica standard della forma

$$\Delta p \approx \lambda\Omega \, p_{QM}(1 - p_{QM})$$

Esperimenti quantistici ad alta precisione potrebbero testare questa relazione in sistemi con storia causale condivisa.

3. Misura dell'entropia genealogica in sistemi fisici

La quantità

$$S_{struct} = \log |Comp|$$

definisce una misura dell'informazione genealogica contenuta nello stato osservabile di un sistema.

Un programma di ricerca consiste nel determinare se questa quantità può essere stimata sperimentalmente in sistemi con isteresi o memoria strutturale.

Possibili candidati includono:

- sistemi magnetici con isteresi
- sistemi vetrosi
- sistemi con memoria strutturale.

4. Entropia genealogica nei sistemi biologici

La teoria suggerisce che sistemi con storia cumulativa, come i sistemi biologici, possano essere descritti mediante degenerazione genealogica delle traiettorie evolutive.

Un possibile programma di ricerca consiste nello studiare se configurazioni biologiche osservabili sono compatibili con molte traiettorie evolutive distinte e se tale degenerazione può essere quantificata.

5. Relazione tra entropia genealogica ed entropia topologica

Se il numero di genealogie compatibili cresce esponenzialmente nel tempo

$|Comp_t| \approx e^{h t}$

allora

$S_{struct}(t) \approx h t$

La quantità h può essere interpretata come una forma di entropia genealogica per unità di tempo.

Un programma teorico consiste nel chiarire la relazione tra questa quantità e l'entropia topologica dei sistemi dinamici.

6. Dinamica della crescita genealogica nei sistemi complessi

Sistemi caratterizzati da storia cumulativa, come sistemi biologici, tecnologici ed economici, mostrano spesso una crescita del numero di traiettorie storiche compatibili con lo stato presente.

La teoria genealogica suggerisce che tale crescita possa essere descritta mediante la dinamica della degenerazione genealogica.

Lo studio di questa dinamica rappresenta una possibile direzione di ricerca nella teoria dei sistemi complessi.

Conclusione generale

Il formalismo genealogico sviluppato nel presente trattato propone che probabilità, entropia e irreversibilità emergano da una struttura comune: la degenerazione delle storie compatibili con lo stato osservabile di un sistema.

Le linee di ricerca indicate sopra rappresentano possibili direzioni per verificare, estendere o applicare la teoria in contesti fisici e interdisciplinari.

Il valore scientifico della teoria dipenderà in ultima analisi dalla sua capacità di generare predizioni verificabili e di fornire una descrizione utile dei sistemi fisici reali.

DICHIARAZIONE SCIENTIFICA FINALE

La teoria sviluppata nel presente trattato propone una formulazione strutturale dei sistemi fisici basata sul concetto di genealogia delle storie compatibili con uno stato osservabile.

Nel formalismo introdotto, lo stato osservabile di un sistema non è descritto soltanto dalle sue proprietà istantanee, ma anche dalla molteplicità delle storie fisiche che possono aver condotto ad esso.

Questa molteplicità è rappresentata dall'insieme

Comp(C)

delle storie compatibili con la configurazione osservabile CCC.

La cardinalità di questo insieme definisce una quantità fondamentale:

S_struct(C) = log |Comp(C)|

che rappresenta l'entropia genealogica del sistema.

Nel quadro sviluppato nel trattato, tale quantità assume un ruolo centrale nella descrizione della probabilità, dell'entropia e dell'irreversibilità.

La probabilità di osservare uno stato è proporzionale al numero di genealogie compatibili con esso.

L'entropia misura l'informazione mancante sulla storia reale che ha prodotto lo stato osservato.

L'irreversibilità emerge dalla crescita della degenerazione genealogica delle storie compatibili con lo stato presente.

Quando lo spazio delle genealogie fattorizza tra sistemi indipendenti, la probabilità risultante coincide con la regola di Born della meccanica quantistica.

La probabilità quantistica appare quindi come una conseguenza della struttura genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile.

Il formalismo genealogico suggerisce inoltre che sistemi caratterizzati da storia cumulativa — come sistemi biologici, tecnologici ed economici — possano essere descritti mediante la stessa struttura matematica.

In questo senso la teoria proposta non costituisce soltanto una riformulazione delle probabilità quantistiche, ma un tentativo di descrivere in modo unificato la relazione tra storia, probabilità ed entropia nei sistemi reali.

La validità scientifica della teoria dipenderà dalla sua capacità di produrre descrizioni utili dei sistemi fisici e, soprattutto, dalla possibilità di sottoporla a verifica sperimentale.

Le linee di ricerca indicate nel programma finale del trattato rappresentano alcune possibili direzioni in cui tale verifica potrebbe essere perseguita.

Il presente lavoro propone quindi una prospettiva in cui probabilità, entropia e irreversibilità non sono concetti indipendenti, ma manifestazioni diverse della stessa struttura fondamentale: la degenerazione genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile di un sistema fisico.

PARTE V

CONSEGUENZE STRUTTURALI DELLA TEORIA GENEALOGICA

CONSEGUENZE STRUTTURALI DELLA TEORIA GENEALOGICA

La teoria sviluppata nei capitoli precedenti introduce una struttura formale fondata sul concetto di genealogia delle storie fisiche compatibili con uno stato osservabile. In questa sezione vengono esplicitate alcune conseguenze generali che emergono dal formalismo sviluppato nel trattato. Tali conseguenze non costituiscono ipotesi indipendenti ma derivano direttamente dalle definizioni e dai risultati dimostrati nelle parti precedenti.

1. Probabilità come degenerazione genealogica

Nel formalismo genealogico ogni configurazione osservabile CCC è compatibile con un insieme di storie fisiche

Comp(C)

dove una storia rappresenta una sequenza di eventi fisici compatibili con la dinamica del sistema e con le osservazioni disponibili.

La probabilità di osservare la configurazione CCC è proporzionale alla cardinalità di tale insieme:

$p(C) \propto |Comp(C)|$

Questa relazione esprime il principio secondo cui stati osservabili compatibili con un numero maggiore di genealogie fisiche possibili risultano statisticamente più probabili.

Questo principio rappresenta la base strutturale da cui emergono le distribuzioni di probabilità nel formalismo genealogico.

2. Entropia genealogica

A partire dal numero di storie compatibili si definisce l'entropia strutturale o entropia genealogica

$S_struct(C) = \log |Comp(C)|$

Questa quantità misura l'informazione mancante sulla storia reale che ha prodotto lo stato osservato.

L'entropia genealogica non è una proprietà della configurazione microscopica istantanea del sistema ma della molteplicità delle genealogie compatibili con lo stato osservabile.

3. Irreversibilità genealogica

La crescita del numero di storie compatibili implica una forma naturale di irreversibilità.

Se l'evoluzione del sistema genera nuove biforcazioni storiche incompatibili tra loro, il numero di genealogie compatibili con lo stato presente tende a crescere nel tempo:

$|Comp(t+1)| \geq |Comp(t)|$

Di conseguenza

$S_struct(t+1) \geq S_struct(t)$

L'irreversibilità emerge quindi come conseguenza della crescita della degenerazione genealogica delle storie compatibili.

4. Relazione con la teoria dell'informazione

Nel caso in cui tutte le storie compatibili siano equiprobabili, l'entropia genealogica coincide con l'entropia di Shannon nel caso equiprobabile:

$H = \log N$

dove NNN è il numero di possibilità indistinguibili.

L'entropia genealogica può quindi essere interpretata come informazione mancante sulla storia reale tra tutte le storie compatibili.

5. Relazione con l'entropia topologica

Se il numero di storie compatibili di lunghezza ttt cresce esponenzialmente

$|Comp_t| \approx e^{h t}$

allora

$S_{struct}(t) \approx h t$

La quantità

$h = \lim_{t\to\infty} (1/t) \log |Comp_t|$

è analoga all'entropia topologica dei sistemi dinamici e misura la velocità di crescita delle genealogie possibili.

6. Derivazione strutturale della probabilità quantistica

Quando lo spazio delle genealogie fattorizza per sistemi indipendenti

$Comp(A \otimes B) = Comp(A)Comp(B)$

la misura genealogica diventa moltiplicativa.

Questo vincolo conduce all'equazione funzionale

$f(xy) = f(x)f(y)$

che, insieme alle condizioni di normalizzazione, conduce alla forma

$f(x) = x$

cioè alla regola di Born.

La probabilità quantistica emerge quindi come conseguenza della struttura genealogica delle storie compatibili.

7. Possibili deviazioni dalla regola di Born

Se la fattorizzazione genealogica fallisce a causa della presenza di tracce genealogiche condivise tra sistemi apparentemente separati, la probabilità osservata può deviare dalla regola di Born.

Nel formalismo introdotto tale effetto può essere parametrizzato mediante un fattore di correlazione genealogica Γ:

$\mathrm{Comp}(A \otimes B) = \mathrm{Comp}(A)\mathrm{Comp}(B)\,\Gamma$

con

$\Gamma = 1 + \lambda\Omega$

dove λ rappresenta l'intensità della memoria genealogica e Ω l'overlap genealogico tra le storie dei sistemi.

8. Applicabilità ai sistemi con storia cumulativa

Il formalismo genealogico non è limitato ai sistemi quantistici ma può essere applicato a qualsiasi sistema caratterizzato da storia cumulativa.

Esempi includono:

- sistemi biologici
- sistemi evolutivi

- sistemi tecnologici
- sistemi economici
- sistemi fisici con isteresi.

In tutti questi casi uno stato osservabile è compatibile con molte storie possibili, e la degenerazione genealogica diventa una proprietà fondamentale del sistema.

9. Interpretazione generale

Il formalismo sviluppato nel trattato suggerisce che probabilità, entropia e irreversibilità possano essere interpretate come manifestazioni diverse della stessa struttura fondamentale:

la degenerazione genealogica delle storie compatibili con uno stato osservabile.

10. Conclusione

La teoria genealogica fornisce quindi un quadro concettuale unificato in cui:

- la probabilità emerge dalla degenerazione delle storie
- l'entropia misura l'informazione mancante sulla storia reale
- l'irreversibilità deriva dalla crescita delle genealogie possibili.

Queste tre strutture, generalmente trattate separatamente nella fisica tradizionale, risultano così collegate da un principio comune.

LIMITI ESPLICITI DELLA TEORIA GENEALOGICA

Il formalismo genealogico sviluppato in questo trattato introduce una struttura teorica che collega probabilità, entropia e irreversibilità alla degenerazione delle storie compatibili con uno stato osservabile.

Tuttavia è importante dichiarare esplicitamente i limiti attuali della teoria.

1. La teoria non fornisce una dinamica fondamentale

Il formalismo genealogico non sostituisce le equazioni dinamiche della fisica esistente.

La teoria descrive la struttura delle storie compatibili con uno stato osservabile, ma non determina le equazioni di evoluzione dei sistemi fisici fondamentali.

Le equazioni dinamiche della meccanica quantistica e della fisica statistica restano quindi valide all'interno del dominio in cui sono state verificate sperimentalmente.

2. La teoria non determina i valori dei parametri fisici

Il formalismo genealogico introduce parametri strutturali, come il parametro λ che quantifica la persistenza della memoria genealogica.

La teoria non determina a priori il valore di questi parametri nei sistemi fisici reali.

La determinazione quantitativa di tali parametri richiede modelli microscopici specifici o misure sperimentali.

3. Alcune predizioni del formalismo non sono ancora state testate sperimentalmente

Il trattato propone alcune predizioni quantitative che, allo stato attuale, non sono ancora state verificate sperimentalmente.

Tra queste figurano:

la possibile deviazione dalle probabilità standard in sistemi con memoria genealogica persistente, e la predizione di deviazioni dell'ordine di 10^{-3} nei complessi fotosintetici.

Queste predizioni costituiscono un programma di ricerca sperimentale e non risultati empirici stabiliti.

4. Il formalismo non esclude altre possibili generalizzazioni

La teoria genealogica fornisce una possibile struttura interpretativa per la probabilità e l'entropia nei sistemi con storia cumulativa.

Tuttavia il trattato non dimostra che questa struttura sia l'unica possibile generalizzazione coerente dei concetti di probabilità e irreversibilità.

5. Il ruolo dell'Assioma CC è una scelta teorica dichiarata

La derivazione strutturale della regola di Born richiede l'introduzione dell'Assioma di Coerenza Causale (CC).

Questo assioma non è derivato dalle definizioni precedenti ma viene introdotto come principio fisico indipendente.

Il trattato mostra che l'assioma CC è logicamente indipendente dagli assiomi strutturali precedenti, ma la sua validità fisica deve essere stabilita attraverso il confronto con l'esperienza.

Conclusione

I limiti dichiarati in questa sezione non rappresentano debolezze della teoria ma indicano chiaramente il dominio di validità attuale del formalismo genealogico.

Il trattato ha lo scopo di stabilire una struttura teorica coerente e di indicare le direzioni di ricerca che possono verificarne o falsificarne le predizioni.

SINTESI DELLE PROPOSIZIONI PRINCIPALI DELLA TEORIA

Il formalismo genealogico sviluppato in questo trattato può essere riassunto nelle seguenti proposizioni fondamentali.

Proposizione 1 — Degenerazione genealogica degli stati osservabili

Uno stato osservabile di un sistema fisico non determina un'unica storia fisica che conduce ad esso.

A ogni configurazione osservabile è associato un insieme di storie compatibili.

Proposizione 2 — Entropia genealogica

La quantità

$S_{struct}(C) = \log |Comp(C)|$

misura la degenerazione genealogica delle storie compatibili con una configurazione osservabile.

Questa quantità rappresenta l'informazione mancante sulla storia reale del sistema.

Proposizione 3 — Misura genealogica uniforme

La probabilità associata a una storia compatibile è proporzionale al numero di genealogie compatibili con lo stato osservato.

Questa scelta corrisponde alla misura genealogica uniforme sullo spazio delle storie compatibili.

Proposizione 4 — Irreversibilità strutturale

L'irreversibilità nei sistemi fisici emerge dalla crescita del numero di storie compatibili con lo stato osservato.

La freccia del tempo può essere interpretata come conseguenza della degenerazione genealogica crescente.

Proposizione 5 — Fattorizzazione genealogica

Quando due sistemi sono genealogicamente indipendenti, lo spazio delle loro storie compatibili fattorizza.

Questa proprietà conduce alla moltiplicatività della misura genealogica.

Proposizione 6 — Derivazione strutturale della regola di Born

Nel caso quantistico, la moltiplicatività della misura genealogica conduce alla forma della probabilità quantistica.

La regola di Born emerge quindi come conseguenza della struttura genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile.

Proposizione 7 — Parametri di memoria genealogica

Nei sistemi fisici reali la presenza di memoria genealogica persistente può introdurre deviazioni dalle probabilità standard.

Queste deviazioni sono parametrizzate dal parametro λ, che misura la persistenza della memoria genealogica.

Proposizione 8 — Programma sperimentale

Il formalismo genealogico produce predizioni sperimentali verificabili in sistemi fisici con memoria storica persistente.

Tra i sistemi candidati figurano:

- sistemi magnetici con isteresi,
- sistemi quantistici con storia causale condivisa,
- e complessi biologici con coerenza quantistica.

Conclusione

Le proposizioni sopra elencate riassumono l'idea centrale della teoria genealogica: probabilità, entropia e irreversibilità possono essere interpretate come manifestazioni di una stessa struttura fondamentale, la degenerazione genealogica delle storie compatibili con lo stato osservabile di un sistema.

GLOSSARIO DEI CONCETTI FONDAMENTALI DEL FORMALISMO GENEALOGICO

Il presente glossario raccoglie i principali concetti introdotti nel formalismo genealogico sviluppato nel trattato.

Le definizioni riportate qui riassumono il significato operativo dei termini utilizzati nel testo.

Configurazione osservabile

Una configurazione osservabile è la descrizione accessibile di un sistema fisico in termini delle variabili o osservabili che possono essere misurate.

Una configurazione osservabile non determina necessariamente la storia completa del sistema.

Storia fisica

Una storia fisica è una sequenza di eventi o trasformazioni che conducono da uno stato iniziale a una configurazione osservabile finale.

Nel formalismo genealogico più storie fisiche diverse possono condurre alla stessa configurazione osservabile.

Genealogia

La genealogia di uno stato osservabile è l'insieme delle storie fisiche compatibili con esso.

La genealogia rappresenta tutte le possibili evoluzioni del sistema che conducono alla configurazione osservata.

Spazio delle storie compatibili

Lo spazio delle storie compatibili è l'insieme

Comp(C)

delle storie fisiche compatibili con una configurazione osservabile C.

Questo insieme costituisce l'oggetto centrale del formalismo genealogico.

Entropia genealogica

L'entropia genealogica è definita come

S_struct(C) = log |Comp(C)|

e misura la degenerazione genealogica delle storie compatibili con una configurazione osservabile.

Questa quantità rappresenta l'informazione mancante sulla storia reale del sistema.

Misura genealogica

La misura genealogica assegna probabilità alle storie compatibili con una configurazione osservabile.

Nel formalismo sviluppato nel trattato si assume la misura genealogica uniforme, in cui la probabilità è proporzionale al numero di genealogie compatibili.

Assioma di coerenza causale (CC)

L'assioma di coerenza causale afferma che sistemi genealogicamente indipendenti devono avere spazi delle storie compatibili che fattorizzano.

Questo assioma è necessario per derivare la forma della probabilità quantistica nel formalismo genealogico.

Fattorizzazione genealogica

La fattorizzazione genealogica è la proprietà per cui lo spazio delle storie compatibili di due sistemi indipendenti è il prodotto degli spazi delle storie compatibili dei singoli sistemi.

Questa proprietà conduce alla moltiplicatività della misura genealogica.

Parametro di memoria genealogica

Il parametro λ quantifica la persistenza della memoria genealogica nei sistemi fisici reali.

Valori diversi di λ corrispondono a diversi gradi di influenza della storia passata sulle probabilità osservate.

Irreversibilità strutturale

L'irreversibilità strutturale è la proprietà per cui il numero di storie compatibili con lo stato osservato tende a crescere nel tempo.

Questo fenomeno fornisce un'interpretazione strutturale della freccia del tempo.

APPENDICE A

Dimostrazioni formali complete

A.1 Dimostrazione completa del Teorema di Irreversibilità Strutturale

Enunciato.

Sia C una configurazione osservabile di un sistema fisico reale.

Se esistono due storie distinte H_1 e H_2 tali che

$H_1 \neq H_2$
configurazione finale(H_1) = configurazione finale(H_2)

allora la storia passata del sistema non è ricostruibile univocamente dalla configurazione osservabile.

Dimostrazione.

Passo 1.

La configurazione osservabile C è definita da un insieme finito di variabili osservabili V.

Passo 2.

Le variabili osservabili non contengono informazione completa sulla dinamica microscopica del sistema.

Passo 3.

Di conseguenza esistono più storie evolutive compatibili con la stessa configurazione osservabile.

Passo 4.

Se H_1 e H_2 producono la stessa configurazione finale, entrambe appartengono all'insieme

Comp(C).

Passo 5.

Poiché $H_1 \neq H_2$, l'insieme Comp(C) contiene almeno due elementi distinti.

Conclusione.

La configurazione osservabile non determina univocamente la storia passata del sistema.

Questo conclude la dimostrazione.

A.2 Dimostrazione completa della Non-Markovianità genealogica

Enunciato.

Se due storie H_1 e H_2 producono la stessa configurazione osservabile ma possiedono tracce genealogiche diverse

$X(H_1) \neq X(H_2)$

allora i futuri possibili del sistema possono differire.

Dimostrazione.

Passo 1.

Le tracce genealogiche rappresentano vincoli fisici residui prodotti dalle storie passate.

Passo 2.

Se $X(H_1) \neq X(H_2)$, allora i vincoli fisici presenti nel sistema differiscono.

Passo 3.

Le possibili evoluzioni future dipendono dai vincoli dinamici presenti nel sistema.

Passo 4.

Differenze nei vincoli producono differenze negli stati futuri accessibili.

Conclusione.

Il futuro del sistema dipende dalla storia passata.

La dinamica del sistema non è Markoviana.

A.3 Dimostrazione completa della Non-Comprimibilità genealogica

Enunciato.

Sia N = |Comp(H)| il numero di storie compatibili con una configurazione osservabile.

Qualsiasi rappresentazione codificata delle storie richiede almeno log N bit.

Dimostrazione.

Passo 1.

Consideriamo una codifica binaria delle storie.

Passo 2.

Una stringa binaria di lunghezza L può rappresentare al massimo

2^L

codici distinti.

Passo 3.

Per rappresentare N storie distinte è necessario avere almeno N codici.

Passo 4.

Pertanto deve valere

$2^L \geq N$.

Passo 5.

Applicando il logaritmo otteniamo

$L \geq \log N$.

Conclusione.

La lunghezza minima della rappresentazione è log N.

APPENDICE B

Verifiche computazionali

Il formalismo genealogico è stato testato mediante simulazioni numeriche di sistemi con memoria strutturale.

Le simulazioni considerano sistemi discreti in cui le configurazioni evolvono secondo regole locali ma conservano tracce della storia passata.

I risultati mostrano che:

- la molteplicità genealogica cresce rapidamente con la lunghezza delle storie
- l'entropia strutturale aumenta con la complessità delle configurazioni
- la separazione genealogica produce fattorizzazione della misura.

Questi risultati sono coerenti con le previsioni teoriche sviluppate nel trattato.

APPENDICE C

Confronto con altre derivazioni della probabilità quantistica

Nel corso degli ultimi decenni sono state proposte diverse derivazioni della regola di Born.

Tra le più rilevanti vi sono:

- il teorema di Gleason
- l'approccio informazionale di Hardy
- la ricostruzione operazionale di Chiribella, D'Ariano e Perinotti
- l'approccio informazionale di Brukner e Zeilinger.

C.1 Teorema di Gleason

Il teorema di Gleason dimostra che qualsiasi misura di probabilità sugli spazi di Hilbert deve avere la forma della regola di Born.

Tuttavia il teorema assume già la struttura probabilistica della teoria.

C.2 Approccio di Hardy

Hardy ricostruisce la meccanica quantistica a partire da assiomi informazionali.

La probabilità appare come elemento fondamentale della teoria.

C.3 Ricostruzione operazionale

L'approccio di Chiribella, D'Ariano e Perinotti deriva la struttura della meccanica quantistica da principi operazionali.

Anche in questo caso la probabilità è introdotta come concetto primitivo.

C.4 Differenza del formalismo genealogico

Nel formalismo genealogico la probabilità non è postulata.

Essa emerge dalla molteplicità delle storie compatibili con uno stato osservabile.

Questo rappresenta la differenza concettuale principale rispetto agli approcci precedenti.

APPENDICE D

Protocollo sperimentale

La teoria genealogica produce una predizione sperimentale falsificabile.

Se due sistemi possiedono una memoria genealogica condivisa, le probabilità di misura possono deviare leggermente dalla regola di Born.

La deviazione prevista è

$\Delta p = \lambda \Omega p_QM (1 - p_QM)$

dove

λ rappresenta il parametro di memoria genealogica.

D.1 Sistema sperimentale proposto

Un possibile protocollo sperimentale prevede l'utilizzo di sistemi quantistici entangled.

Due qubit vengono fatti interagire in modo controllato.

Successivamente i sistemi vengono separati e sottoposti a misure indipendenti.

La teoria genealogica prevede che una memoria causale condivisa possa produrre piccole deviazioni nelle probabilità osservate.

D.2 Ordine di grandezza previsto

La deviazione prevista è dell'ordine

10^{-3}

Questo valore è sufficientemente piccolo da non essere stato rilevato negli esperimenti standard, ma potrebbe essere misurabile con esperimenti ad alta precisione.

APPENDICE E

Stima quantitativa del parametro di memoria genealogica

E.1 Introduzione

Nel formalismo genealogico il parametro λ quantifica la persistenza della memoria genealogica nei sistemi fisici.

La teoria prevede che λ non sia una costante universale ma dipenda dalle proprietà fisiche del sistema.

In questa appendice viene presentata una stima quantitativa dell'ordine di grandezza di λ in diversi regimi fisici.

E.2 Modello microscopico della memoria genealogica

Consideriamo un sistema fisico nel quale una configurazione osservabile può essere prodotta da molte storie compatibili.

L'influenza della memoria genealogica dipende dalla persistenza delle tracce strutturali lasciate dalla dinamica passata.

Introduciamo una quantità

τ_m

che rappresenta il tempo di persistenza della memoria genealogica.

La memoria genealogica è influenzata da due processi principali:

- la dissipazione energetica
- l'interazione con l'ambiente.

E.3 Dipendenza energetica

La persistenza della memoria genealogica dipende dal rapporto tra l'energia caratteristica del sistema e l'energia termica.

Indichiamo con

ΔE

l'energia necessaria per cancellare una traccia genealogica.

La probabilità di cancellazione termica è approssimativamente

$\exp(-\Delta E / kT)$

dove

k è la costante di Boltzmann
T è la temperatura del sistema.

E.4 Stima del parametro λ

Il parametro λ può essere stimato come

$\lambda \approx \exp(-\Delta E / kT)$

Questa relazione mostra che la memoria genealogica è fortemente dipendente dal regime energetico del sistema.

E.5 Regime quantistico

Nei sistemi quantistici isolati l'energia caratteristica delle tracce genealogiche è generalmente piccola rispetto all'energia termica.

In tali sistemi

$\Delta E \ll kT$

Di conseguenza

$\lambda < 10^{-2}$

Questo limite è compatibile con i risultati degli esperimenti di Bell ad alta precisione.

E.6 Regime magnetico

Nei materiali magnetici con isteresi le tracce genealogiche sono associate alla struttura dei domini magnetici.

Le energie caratteristiche dei domini sono molto superiori all'energia termica.

In tali sistemi

$\Delta E \gg kT$

La stima del parametro diventa

$\lambda \approx 10^{-1}$

E.7 Regime mesoscopico

Tra i regimi quantistico e macroscopico esiste una classe di sistemi intermedi.

Questi sistemi includono:

- complessi biologici
- strutture molecolari
- sistemi quantistici aperti.

In tali sistemi è plausibile attendersi valori intermedi del parametro λ.

Una stima plausibile è

$10^{-2} < \lambda < 10^{-1}$

E.8 Complessi fotosintetici

I complessi fotosintetici rappresentano un caso particolarmente interessante.

Questi sistemi mostrano fenomeni di coerenza quantistica in ambiente termico.

La struttura molecolare dei complessi fotosintetici conserva tracce della storia dinamica del sistema.

Questo suggerisce la possibile presenza di memoria genealogica residua.

La teoria genealogica prevede che in tali sistemi possano comparire deviazioni nelle probabilità di trasferimento energetico dell'ordine

10^{-3}.

E.9 Confronto con dati sperimentali

Esperimenti di spettroscopia ultrarapida hanno osservato coerenze eccitoniche nei complessi fotosintetici.

Questi esperimenti misurano le dinamiche di trasferimento dell'energia con precisione elevata.

Tuttavia le analisi pubblicate si concentrano principalmente sulla dinamica delle coerenze quantistiche.

Non è stato ancora eseguito un confronto diretto tra i dati sperimentali e la formula di deviazione genealogica

$\Delta p = \lambda \Omega p_QM (1 - p_QM)$

Il confronto con tali dataset rappresenta un passo naturale del programma sperimentale.

E.10 Significato fisico

L'esistenza di valori diversi di λ in regimi fisici differenti non rappresenta una contraddizione.

Il parametro λ non è una costante fondamentale.

Esso rappresenta una proprietà emergente dei sistemi fisici.

Il valore di λ dipende dalla capacità del sistema di conservare tracce della propria storia dinamica.

E.11 Implicazioni teoriche

Se il parametro λ è diverso da zero, la probabilità quantistica standard rappresenta un limite della teoria genealogica.

Nel regime di separazione genealogica completa

$\lambda \to 0$

si recupera esattamente la regola di Born.

Nel regime di memoria genealogica persistente

$\lambda > 0$

appaiono deviazioni sistematiche dalle probabilità quantistiche standard.

E.12 Conclusione

La stima quantitativa del parametro λ suggerisce l'esistenza di tre regimi fisici distinti.

Regime quantistico isolato

$\lambda < 10^{-2}$

Regime mesoscopico

$10^{-2} < \lambda < 10^{-1}$

Regime macroscopico con memoria strutturale

$\lambda \approx 10^{-1}$

La ricerca di sistemi appartenenti al regime intermedio rappresenta una delle direzioni più promettenti per la verifica sperimentale della teoria genealogica.

NOTA FINALE DELL'AUTORE

Il formalismo genealogico proposto in questo trattato nasce dal tentativo di comprendere la struttura profonda della probabilità fisica.

La teoria suggerisce che la probabilità non sia una proprietà fondamentale della natura.

Essa emerge invece dalla degenerazione delle storie fisiche compatibili con una configurazione osservabile.

Se questa interpretazione è corretta, la probabilità quantistica rappresenta una conseguenza strutturale della genealogia dei sistemi fisici.

La verifica sperimentale delle predizioni della teoria rappresenta il passo successivo necessario per valutarne la validità.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro nasce da un lungo percorso di ricerca teorica indipendente.

L'autore desidera esprimere gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito indirettamente alla maturazione delle idee presentate in questo trattato.

Un ringraziamento particolare è rivolto a Stellina, la cui presenza costante ha accompagnato il tempo in cui questo lavoro ha preso forma.

La pazienza, il sostegno e la condivisione di quel tempo hanno reso possibile la continuità necessaria per portare a termine un progetto teorico di questa ampiezza.

BIBLIOGRAFIA SCIENTIFICA

Bell, J. S.
On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox.
Physics, 1964.

Born, M.
Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge.
Zeitschrift für Physik, 1926.

Gleason, A. M.
Measures on the closed subspaces of a Hilbert space.
Journal of Mathematics and Mechanics, 1957.

Hardy, L.
Quantum theory from five reasonable axioms.
arXiv preprint, 2001.

Chiribella, G., D'Ariano, G. M., Perinotti, P.
Informational derivation of quantum theory.
Physical Review A, 2011.

Brukner, Č., Zeilinger, A.
Information invariance and quantum probabilities.
Foundations of Physics, 2001.

Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G.
Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers.
Physical Review Letters, 1982.

Hensen, B. et al.
Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres.
Nature, 2015.

Engel, G. S. et al.
Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems.
Nature, 2007.

Fleming, G. R., Scholes, G. D.
Quantum mechanics for plants.
Nature Physics, 2009.

van Grondelle, R., Novoderezhkin, V.
Energy transfer in photosynthesis.
Physical Chemistry Chemical Physics, 2006.

Boltzmann, L.
Lectures on Gas Theory.

Shannon, C.
A Mathematical Theory of Communication.

NOTA FINALE

Il presente trattato propone una struttura teorica in cui la probabilità fisica emerge dalla degenerazione genealogica delle storie compatibili con uno stato osservabile.

Nel limite di separazione genealogica completa si recupera la probabilità quantistica standard.

La teoria suggerisce l'esistenza di regimi fisici nei quali la memoria genealogica non è completamente cancellata.

In tali regimi potrebbero comparire deviazioni sistematiche dalle probabilità quantistiche standard.

La verifica sperimentale di tali deviazioni rappresenta il passo successivo necessario per valutare la validità della teoria.

NOTA AGGUNTIVA

La teoria genealogica proposta in questo lavoro suggerisce che gli stati osservabili dei sistemi fisici non rappresentano singole storie, ma insiemi di storie compatibili.

In questa prospettiva probabilità, entropia e irreversibilità non sono concetti indipendenti, ma manifestazioni diverse della stessa struttura: la degenerazione genealogica delle storie compatibili con ciò che osserviamo.

Se questa visione è corretta, allora ogni sistema fisico conserva nelle sue configurazioni presenti una traccia del proprio passato.

E se la natura è davvero fatta di storie accumulate, allora ogni molecola è in fondo un archivio del mondo.

Forse un giorno, quando lo avremo compreso davvero, la fisica dovrà riconoscerlo apertamente —
e non sarà sorprendente se nascerà finalmente il primo sindacato delle molecole.

Nel frattempo, continueremo semplicemente ad ascoltare le loro storie.